مطالعهٔ آزمایشگاهی تعادل نیروها و اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار*

پژوهشی

مصطفی دولتی مهتاج[۱] بهرام رضائی[۲]

چکیده در کانال‌های مرکب غیرمنشوری به‌دلیل تبادل جرم و اندازه حرکت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال نسبت‌به کانال‌های مرکب منشوری بیشتر است. درنتیجه در این کانال‌ها مطالعهٔ تنش برشی ظاهری ایجاد شده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها پیچیده‌تر است. در پژوهش حاضر توزیع سرعت و تنش برشی در مقاطع مختلف و در طول ناحیهٔ اریب کانال مرکب به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده‌است. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و معادلات اندازه حرکت، اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها برای دو زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و در سه عمق نسبی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ انجام شده‌است. بررسی‌ها نشان‌دهندهٔ آن است که اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا عموما بیشتر از اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است. هم‌چنین شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها سبب افزایش مقدار نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده‌است.

واژه‌های کلیدی اندرکنش جریان، تعادل نیروها، کانال مرکب مورب، سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار، نیروی برشی ظاهری.

Experimental Study of Force Balance and Interaction between Flow in the Main Channel and on the Floodplains in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains

M. Dolati Mahtaj B. Rezaei

Abstract *In non-prismatic compound channels due to the mass and momentum exchange between the main channel and floodplains, the flow interaction between channel sub-sections is higher than prismatic compound channels. As a result, in this form of channels, the study of apparent shear forces create at the vertical interface between the main channel and floodplains are much more complex. In the present research, the velocity and boundary shear stress distributions were measured at different sections along the skew part of the flume. Also using the experimental data and the momentum equations the flow interaction between the main channel and floodplains have been investigated. Measurements have been performed for two skew angles of 11.31 and 3.81 degrees and three relative depths of 0.2, 0.3 and 0.4. Investigations indicate that the flow interaction between the main channel and the converging floodplain is generally greater than the flow interaction between the main channel and the diverging floodplain. Also, the side slope of the floodplains, has increased the amount of apparent shear force at the interface between the main channel and floodplains.*

Key Word Flow interaction, Force balance, Skewed compound channel, Inclined floodplains, Apparent shear force.

* تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۰/۳/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۲۰ و از صفحه ۸۷ تا ۱۰۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.

Email: b.rezaei@basu.ac.ir

مقدمه

یکی از مباحث مهم در مهندسی رودخانه، شناخت ویژگی‌ها و خصوصیات جریان‌های سیلابی است که برای این منظور می‌توان از نتایج مطالعات انجام‌شده بر روی کانال‌های مرکب بهره برد. کانال‌های مرکب از یک کانال اصلی عمیق در وسط و یک یا دو سیلاب‌دشت با عمق جریان کمتر در اطراف آن تشکیل می‌شوند. در رودخانه‌ها در حالت عادی و غیرسیلابی جریان در کانال اصلی برقرار است لیکن در هنگام وقوع سیلاب، باتوجه به افزایش تراز سطح آب، جریان مازاد بر ظرفیت مقطع اصلی رودخانه وارد سیلاب‌دشت‌های اطراف آن می‌شود. در کانال‌های مرکب باتوجه به کمتر بودن سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها نسبت‌به کانال اصلی، یک لایهٔ برشی در فصل مشترک بین آنها ایجاد می‌شود که باعث کاهش ظرفیت انتقال کل مقطع کانال می‌شود [1] و هم‌چنین سبب ایجاد جریان‌های ثانویهٔ مارپیچی در جهت جریان و گردابه‌هایی در جهت قائم می‌شود [2].

شکل مقطع عرضی و مسیر حرکت رودخانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل گوناگونی نظیر توپوگرافی محل، نوع خاک بستر و هم‌چنین میزان حمل رسوب قرار دارد. باتوجه به این موضوع در طبیعت اغلب رودخانه‌ها دارای مقطع مرکب غیرمنشوری هستند. یکی از انواع کانال‌های مرکب غیرمنشوری، کانال‌های مرکب مورب می‌باشند. این نوع از کانال‌های مرکب غیرمنشوری به دو گروه کلی کانال‌های مرکب با مقطع اصلی مورب و کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب تقسیم می‌شوند [3].

جیمز و براون [4] نخستین محققانی بودند که جریان در کانال‌های مرکب با کانال اصلی مورب را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنان دریافتند که جریان در سیلاب‌دشت دریافت‌کنندهٔ جریان (واگرا) سرعت می‌گیرد لیکن سرعت جریان در سیلاب‌دشت همگرا کاهش می‌یابد. هم‌چنین آنان بیان نمودند که با افزایش زاویهٔ اریب کانال اصلی، مقاومت جریان در کل مقطع عرضی کانال افزایش می‌یابد. جاسم [5] و اروین و جاسم [6] ویژگی‌های جریان در کانال مرکب با مقطع اصلی مورب را بررسی کردند. آنان دریافتند که در کانال مرکب با مقطع اصلی مورب، جریان عبوری از روی کانال اصلی تحت تأثیر جریان سریع جاری در آن، در جهت اریب کانال اصلی منحرف می‌شود. آنان بیان نمودند که این میزان انحراف به عمق نسبی جریان و زبری بستر سیلاب‌دشت‌ها بستگی دارد به‌نحوی که با کاهش عمق نسبی جریان و یا با افزایش زبری سیلاب‌دشت‌ها، میزان انحراف جریان بیشتر می‌شود.

نوع دیگر کانال‌های مرکب مورب، کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب هستند. در این نوع کانال مرکب، یکی از سیلاب‌دشت‌ها به‌صورت همگرا و دیگری به‌شکل واگرا است. در طول ناحیهٔ اریب کانال، جریان به‌تدریج سیلاب‌دشت همگرا را ترک می‌کند و در طرف مقابل جریان به‌تدریج وارد سیلاب‌دشت واگرا می‌شود [7]. الیوت و سلین [8] و سلین [9] خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را مطالعه کردند. آنان بیان نمودند که اریب بودن سیلاب‌دشت‌ها سبب کاهش ظرفیت انتقال جریان در کانال می‌شود به‌نحوی‌که در یک عمق جریان یکسان، میزان دبی عبوری از کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب نسبت‌به کانال‌های مرکب مستقیم (منشوری) با همان سطح مقطع، کمتر است. سیف و رضائی [10] اثر زاویهٔ اریب در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب بر اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها را به‌صورت عددی بررسی کردند. آنان برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی خود از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط الیوت [11] و الیوت و سلین [8] استفاده کردند. آنان هم‌چنین بیان نمودند که افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها سبب افزایش نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده‌است که به‌معنی افزایش اندرکنش

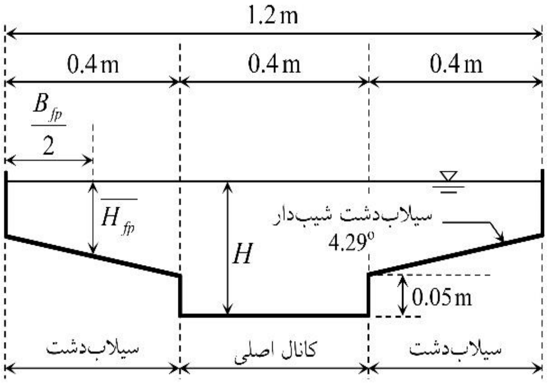
میان آنها است. چلبک [3] با بررسی مجدد نتایج حاصل از مطالعات الیوت [11]، بیان نمود که بیشترین سرعت متوسط در عمق در نزدیکی دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا قرار دارد و مقدار آن می‌تواند تا ۱/٦ برابر سرعت متوسط جریان در کانال نیز باشد. هم‌چنین او دریافت که محل بیشترین مقدار تنش برشی مرزی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است و مقدار آن می‌تواند تا ۲/۵ برابر تنش برشی متوسط کانال نیز برسد. چلبک [3] هم‌چنین با انجام آزمایش‌هایی برروی کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب، مشاهده نمود که شرایط جریان در این نوع کانال مرکب به‌صورت غیریکنواخت است و تغییرات درصد دبی عبوری از هر یک از زیربخش‌های کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب (شامل سیلاب‌دشت همگرا، کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا) در طول ناحیهٔ اریب به‌صورت خطی است. چلبک و همکاران [12] جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب، همگرا و واگرا را با یکدیگر مقایسه کردند و افت انرژی به‌وجودآمده را بررسی نمودند. بوزمار و همکاران [13] با تأیید نتایج حاصل از مطالعات چلبک [3]، اثر زبر بودن بستر سیلاب‌دشت‌ها برروی ویژگی‌های جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را بررسی کردند.

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققان پیشین نشان‌دهندهٔ آن است که تاکنون اثر شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها در کانال‌های مرکب مورب بر میدان جریان و اندرکنش جریان بین سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی مورد بررسی قرار نگرفته‌است. در این پژوهش سعی بر این است که با بررسی آزمایشگاهی میدان جریان در کانال‌های مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار و با تعیین نیرو های تأثیر گذار در آن ها، اندرکنش جریان بین زیربخش ها در این نوع کانال مرکب مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش آزمایش‌ها برای دو زاویهٔ اریب و سه عمق نسبی مختلف انجام شده‌است.

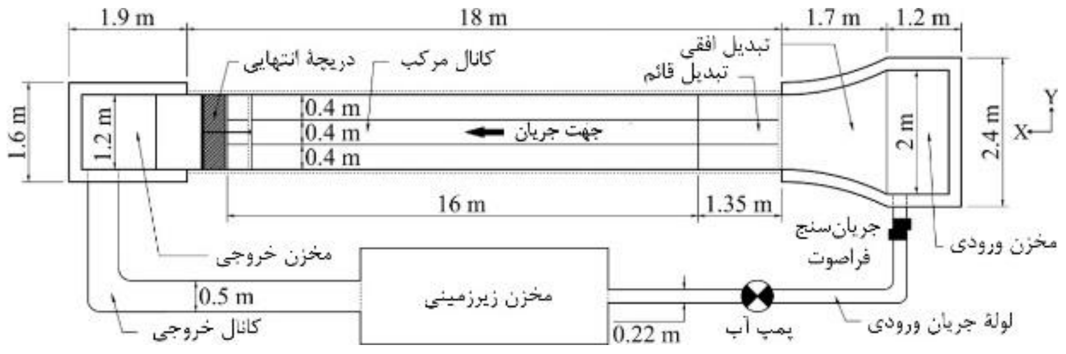
مواد و روش‌ها

معرفی کانال و وسایل آزمایشگاهی

این پژوهش برروی کانال آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا انجام شده‌است. این کانال دارای طول کلی ۱۸ متر، عرض ۱/۲ متر و عمق ۰/٦ متر است و متوسط شیب طولی کف آن برابر با $۱/٦۳\times۱۰^{-۳}$ است. مقطع عرضی این کانال آزمایشگاهی بااستفاده از ورق‌های PVC به‌شکل مرکب ساخته شده‌است. این کانال مرکب از یک کانال اصلی مستطیلی‌شکل با عرض و عمق به‌ترتیب ۰/٤ و ۰/۰۵ متر در وسط و دو سیلاب‌دشت در طرفین آن با عرض ۰/٤ متر و شیب جانبی ۰/۰۷۵ (متناظر با زاویهٔ جانبی ٤/۲۹ درجه) تشکیل شده‌است. شکل (۱) مقطع عرضی کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد که در آن B_{fp} عرض سیلاب‌دشت، H عمق جریان در کانال اصلی و $\overline{H_{fp}}$ میانگین عمق جریان برروی سیلاب‌دشت است. هم‌چنین در شکل (۲) نمای از بالای کانال آزمایشگاهی نشان داده شده‌است.



شکل ۱ مقطع عرضی کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار



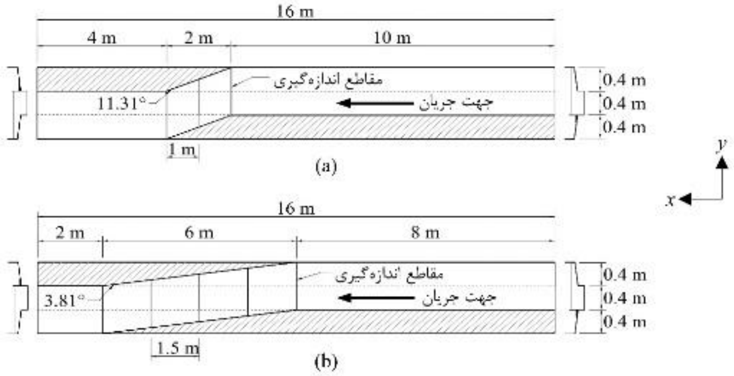
شکل ۲ نمای از بالای کانال آزمایشگاهی

با نصب پروفیل‌های نبشی فولادی برروی سیلاب‌دشت‌ها، کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب ساخته شده‌است. آزمایش‌ها در دو طول اریب ۲ و ٦ متر (متناظر با زاویه‌های اریب به‌ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه) انجام شده‌است. برای اطمینان از توسعه یافتن جریان و وجود طول کافی برای ایجاد شرایط جریان یکنواخت در قسمت منشوری‌شکل بالادست ناحیهٔ اریب کانال، شروع ناحیهٔ اریب در فواصل ۱۰ و ۸ متری از ابتدای کانال مرکب برای آزمایش‌های انجام‌شده در زاویه‌های اریب به‌ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه، انتخاب شده‌است. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای نام‌گذاری کانال مرکب با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه به‌ترتیب از عبارت‌های SCIF-2 و SCIF-6 استفاده شده‌است. اندازه‌گیری‌ها در ۳ مقطع با فواصل ۱ متر در طول ناحیهٔ اریب کانال برای آزمایش‌های با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ درجه و در ۵ مقطع با فواصل ۱/۵ متر برای آزمایش‌های با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه انجام شده‌است. شکل (۳) نمای کلی و مشخصات هندسی کانال‌های مرکب مورب مورد بررسی در این تحقیق و هم‌چنین موقعیت مقاطع اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر آزمایش‌ها در سه عمق نسبی به‌ترتیب ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ انجام شده‌است. باتوجه به شیب‌دار بودن سیلاب‌د شت‌ها، از میانگین عمق جریان برروی سیلاب‌دشت برای تعریف عمق نسبی جریان مطابق با رابطهٔ $D_r = \frac{\overline{H_{fp}}}{H}$ استفاده شده که در آن D_r معرف عمق نسبی جریان، $\overline{H_{fp}}$ میانگین عمق جریان برروی سیلاب‌دشت‌ها و H عمق جریان در کانال اصلی است (شکل ۱). لازم به ذکر است که این عمق نسبی در قسمت منشوری‌شکل بالادست ناحیهٔ اریب کانال تنظیم شده‌است.

در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری سرعت جریان از سنجشگر جانب‌نگر دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) با فرکانس ۲۰۰ هرتز و در مدت‌زمان ٦۰ ثانیه استفاده شده‌است. هم‌چنین داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری سرعت توسط ADV بااستفاده از نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالاتر از ۱۵ و هم‌بستگی (Correlation) بیشتر از ۷۵ درصد اصلاح شده‌اند. توزیع سرعت جریان در فواصل عرضی ۲۰ و ارتفاعی ۱۰ میلی‌متر در ۳ و ۵ مقطع (مطابق شکل ۳) اندازه‌گیری شده‌است. هم‌چنین به‌منظور بررسی اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در طول ناحیهٔ اریب کانال، توزیع عمقی سرعت در فواصل ۰/۲۵ و ۰/۵ متر برای سری آزمایش‌های با زاویهٔ اریب به‌ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه، در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده‌است. تنش برشی مرزی به‌وسیلهٔ لولهٔ پرستون (Preston tube) با قطر خارجی ٤ میلی‌متر در اطراف پیرامون مرطوب تمامی مقاطع اندازه‌گیری شده‌است. این اندازه‌گیری‌ها در فواصل عرضی ۲۰ میلی‌متر برروی کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و در فواصل ارتفاعی ۱۰ میلی‌متر برروی

دیوارەها انجام شده‌است. شکل (٤) تصویری از دستگاه سرعت‌سنج ADV و لولهٔ پرستون در حال اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری عمق جریان در امتداد کانال نیز از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری دبی ورودی به کانال از دستگاه جریان‌سنج فراصوت (Ultrasonic flow meter) نصب‌شده برروی لولهٔ انتقال آب به کانال، استفاده شده‌است. مقادیر دبی‌ها و سایر ویژگی‌های هیدرولیکی نظیر عمق، عمق نسبی و عدد فرود جریان در جدول (۱) آورده شده‌است.



شکل ۳ مشخصات هندسی و محل مقاطع اندازه‌گیری در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)



(b) (a)

شکل ٤ تصویری از (a) سنجشگر جانب‌نگر دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV)، (b) لولهٔ پرستون در حال اندازه‌گیری

جدول ۱ خلاصهٔ ویژگی‌های هیدرولیکی جریان

Exp.	Skewed angle, θ	D_r	H (m)	Q (m^3/s)	U_m (m/s)	D (m)	$F_r = \frac{U_m}{(gD)^{0.5}}$
SCIF-2	۱۱/۳۱°	۰/۲	۰/۰۸۲	۰/۰۲۳۵	۰/۵۹۹	۰/۰٤۹	۰/۸٦٤
		۰/۳	۰/۰۹٤	۰/۰۳۰۲	۰/٦۱۷	۰/۰٦۱	۰/۷۹٦
		۰/٤	۰/۱۰۸	۰/۰٤۲۲	۰/۷۰۱	۰/۰۷٦	۰/۸۱۲
SCIF-6	۳/۸۱°	۰/۲	۰/۰۸۲	۰/۰۲۳۱	۰/۵۸۱	۰/۰٤۹	۰/۸۳۲
		۰/۳	۰/۰۹۳	۰/۰۲۷۸	۰/۵۹۰	۰/۰٦۰	۰/۷٦٦
		۰/٤	۰/۱۰۹	۰/۰٤۰۹	۰/٦٦۸	۰/۰۷٦	۰/۷۷۲

بحث و نتایج

سرعت جریان

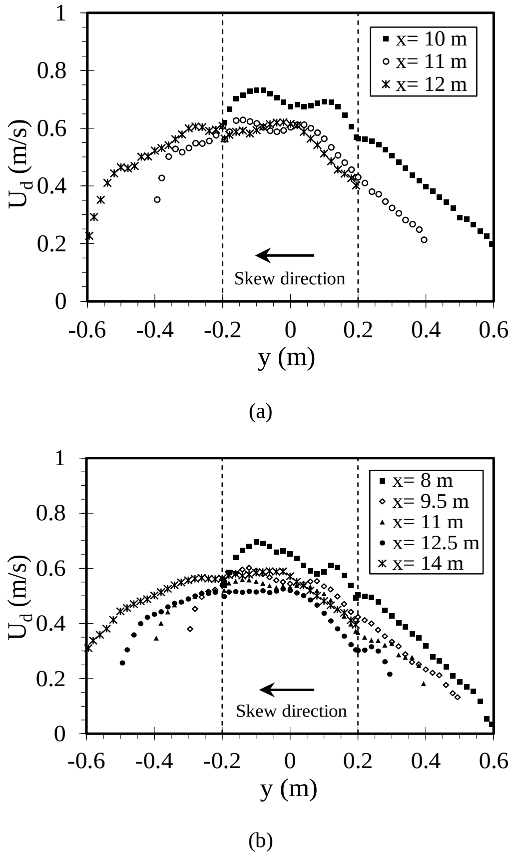
با انتگرال‌گیری عددی در عمق از مؤلفهٔ طولی داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده تو سط ADV، مقادیر سرعت متوسـط در عمق در تمامی مقاطع مطابق با رابطهٔ (۱) محاسبه شده‌است.

$$U_d = \frac{1}{h}\sum_{i=1}^{n} u_i \Delta h_i \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱)، U_d سرعت متوسط در عمق، h عمق جریان در محل محاسـبهٔ سـرعت متوسـط در عمق، u_i مؤلفهٔ طولی سـرعت جریان و Δh_i متوسـط فاصـلهٔ بین نقاط اندازه‌گیری است.

شکل (۵) توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در طول قسمت اریب برای کانال مرکب با دو زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و عمق نسبی ۰/۳ را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۵) می‌توان دریافت که توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در کانال‌های مرکب مورب نامتقارن است و نواحی با سرعت جریان بیشینه در نزدیکی سیلاب‌دشت واگرا قرار دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در کانال‌های مرکب مورب سرعت جریان در مقطع ابتدایی ناحیهٔ اریب کانال همواره بیشترین مقدار را دارد و با حرکت در امتداد ناحیهٔ اریب، سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا کاهش پیدا می‌کند لیکن سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، میزان سرعت جریان در کل مقطع عرضی کانال به‌ویژه برروی سیلاب‌دشت واگرا افزایش یافته‌است.

بررسـی‌های انجام شـده نشـان‌دهندهٔ آن اسـت که سرعت جریان در سیلاب‌د شت واگرا همواره در تمامی مقـاطع انـدازه‌گیری بزرگ‌تر از سـرعـت جریـان در سیلاب‌د شت همگرا ا ست. برای نمونه در مقطع میانی ناحیهٔ اریب کانال، سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا به‌طور متوسـط در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ درجه در حدود ۱/۸ و در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه نزدیک به ۱/٦ برابر سـرعت جریان در سیلاب‌دشت همگرا است.



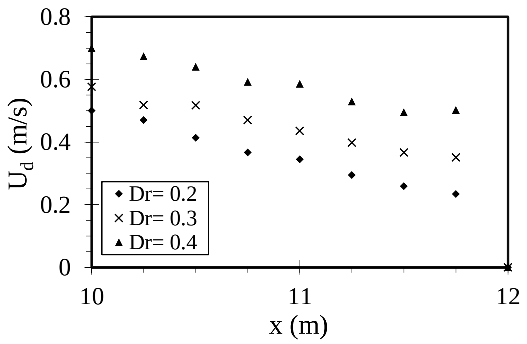
شکل ۵ توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق در مقاطع مختلف برای عمق نسبی ۰/۳ و در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)

سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

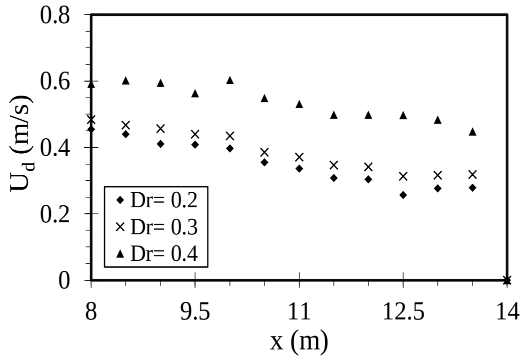
به‌منظور تعیین میزان تبادل اندازه حرکت صورت‌گرفته بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، توزیع سرعت متوسط در عمق جریان در طول ناحیهٔ اریب کانال در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده‌است. در شکل‌های (٦) و (۷) تغییرات سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا در کانال‌های مرکب با

زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه نشان داده شده‌است. از شکل‌های (٦) و (۷) می‌توان دریافت که برای هر دو سری آزمایش و در عمق‌های نسبی مختلف، متوسط سرعت جریان در طول ناحیهٔ مورب و در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سیلاب‌دشت همگرا ۳۸ درصد بزرگ‌تر است. روندی مشابه در مطالعات انجام‌شده توسط الیوت [11] نیز گزارش شده‌است.

هم‌چنین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش عمق نسبی جریان، اختلاف بین سرعت جریان در طول فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای عمق‌های نسبی مختلف در آزمایش‌های سری SCIF-2 و SCIF-6 به‌طور میانگین به‌ترتیب ۷۱/٤ و ۵۷/۷ درصد کاهش یافته‌است.

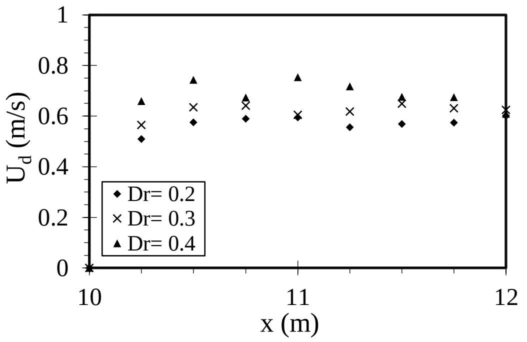


(a)

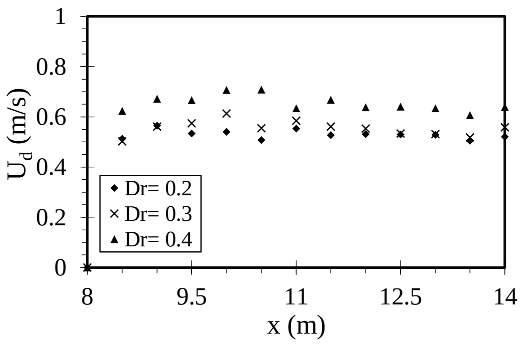


(b)

شکل ٦ تغییرات سرعت متوسط در عمق در طول ناحیهٔ اریب در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا برای زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱ (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱ (SCIF-6)



(a)



(b)

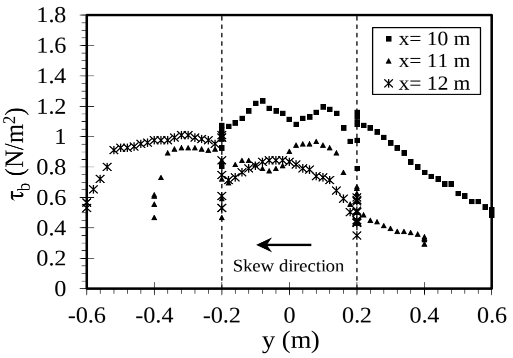
شکل ۷ تغییرات سرعت متوسط در عمق در طول ناحیهٔ اریب در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا برای زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱ (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱ (SCIF-6)

شکل (٦) هم‌چنین نشان می‌دهد که توزیع سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا در طول ناحیهٔ اریب روندی کاهشی دارد. این میزان کاهش برای کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ درجه برابر ٤۰/۳ درصد و برای کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه نزدیک به ۳۲/٤ درصد است. با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، این میزان کاهش سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا به‌طور متوسط ۲۳/۱ درصد بیشتر شده‌است. این درحالی است که تغییرات سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا با حرکت جریان در طول ناحیهٔ اریب کانال، دارای روندی افزایشی و سپس کاهشی با شیبی اندک است (شکل ۷).

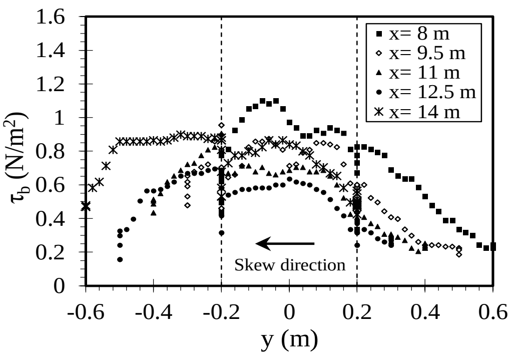
تنش برشی مرزی

شکل (۸) توزیع عرضی تنش برشی مرزی را در مقاطع مختلف در امتداد ناحیهٔ اریب، برای کانال مرکب با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه و عمق نسبی ۰/۳ نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۸) توزیع عرضی تنش برشی مرزی در کانال‌های مرکب مورب به‌صورت نامتقارن است و در تمام مقاطع اندازه‌گیری تنش برشی مرزی در سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است. نتایج مشابهی توسط محققان پیشین [12, 10, 8] گزارش شده‌است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، متوسط تنش برشی در سیلاب‌دشت واگرا بیش از ۱/٦ برابر متوسط تنش برشی در سیلاب‌دشت همگرا برای یک مقطع اندازه‌گیری یکسان است.



(a)



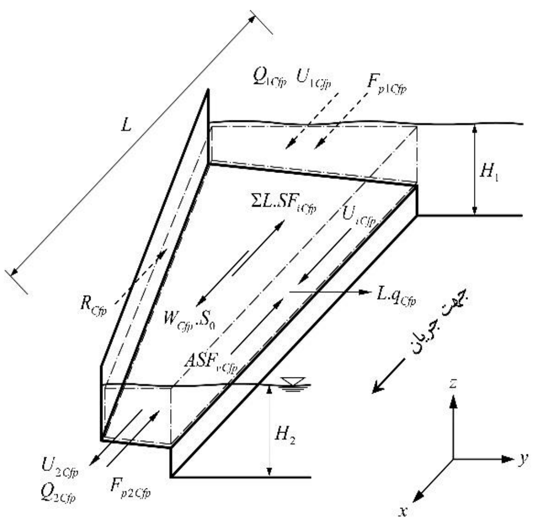
(b)

شکل ۸ توزیع عرضی تنش برشی مرزی در پیرامون مرطوب مقاطع مختلف برای عمق نسبی ۰/۳ و در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) □۱۱/۳۱ (SCIF-2)، (b) □۳/۸۱ (SCIF-6)

شکل (۸) هم‌چنین نشان می‌دهد که با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها، تنش برشی مرزی در کل مقطع عرضی کانال به‌ویژه در مقاطع ابتدایی و میانی ناحیهٔ اریب کانال افزایش می‌یابد لیکن در مقطع انتهایی این میزان افزایش ناچیز است.

نیروی برشی ظاهری

در این پژوهش بااستفاده از نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های سرعت، دبی، نیم‌رخ طولی سطح آب و تنش برشی مرزی نیروی‌های موجود در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا محاسبه شده‌است. هم‌چنین به‌منظور مطالعهٔ اندرکنش جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، نیروهای برشی ظاهری ایجادشده در این نواحی به‌کمک موازنهٔ اندازه حرکت در طول ناحیهٔ اریب کانال محاسبه شده‌اند. برای رسیدن به این هدف حجم محصور بین دو مقطع اندازه‌گیری در طول ناحیهٔ اریب کانال به‌عنوان حجم کنترل (Control volume) درنظر گرفته شده‌است. شکل (۹) نشان‌دهندهٔ حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا است.



شکل ۹ حجم کنترل بین دو مقطع اندازه‌گیری متوالی در سیلاب‌دشت همگرا

باتوجه به شکل (۹) و بااستفاده از اصل بقای اندازه حرکت برای جریان دائمی، می‌توان نوشت:

$$F_{p1Cfp} - F_{p2Cfp} + W_{Cfp}S_0 - \sum LSF_{iCfp} - R_{Cfp} - ASF_{vCfp} = \rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp} - \rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp} + \rho U_{iCfp}q_{Cfp}L \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، F_p نیروی فشار هیدرواستاتیک، W وزن آب موجود در حجم کنترل، S_0 شیب کف کانال، ΣLSF_i مجموع نیروهای برشی واردشده از طرف مرزهای کانال بر سیال موجود در حجم کنترل، R_{Cfp} مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا درجهت جریان (محور x)، ASF_{vCfp} نیروی برشی ظاهری ایجادشده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا، ρ جرم مخصوص آب، β ضریب اصلاح اندازه حرکت، U سرعت متوسط جریان، Q دبی جریان عبوری، U_{iCfp} متوسط سرعت جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا، q_{Cfp} جریان عرضی خروجی از سیلاب‌دشت همگرا در واحد طول کانال و L فاصلهٔ بین مقاطع انتخابی (طول حجم کنترل) است. هم‌چنین زیرنویس Cfp معرف سیلاب‌دشت همگرا است و زیرنویس‌های (۱) و (۲) نشان‌دهندهٔ مقطع بالادست و پایین‌دست حجم کنترل هستند. با جای‌گذاری روابط محاسبهٔ نیروی وزن و نیروی برشی مرزی در رابطهٔ (۲) و با مرتب کردن آن خواهیم داشت:

$$\left(F_{p1Cfp} - F_{p2Cfp}\right) - \rho g\bar{A}_{Cfp}LS_0 + (\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L + R_{Cfp} + (\rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp} - \rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp}) + \rho U_{iCfp}q_{Cfp}L + ASF_{vCfp} = 0 \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳) g شتاب ثقل، $\overline{A}_{Cfp}$ متوسط سطح مقطع جریان در حجم کنترل $(\overline{A}_{Cfp} = (A_{1Cfp}+A_{2Cfp})/2)$ و $\overline{SF}_6$ و $\overline{SF}_7$ نیز به‌ترتیب متوسط نیروی برشی در واحد طول وارد بر کف و دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا هستند.

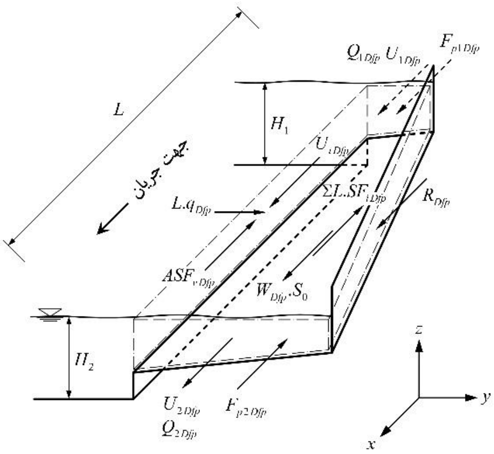
این دو نیروی برشی با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های تنش برشی مرزی اندازه‌گیری‌شده برروی کف و دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا محاسبه شده‌اند. مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا در راستای جریان (محور x)، برابر نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر تصویر دیواره برروی صفحهٔ عمود بر جهت جریان (صفحهٔ yz) است و بااستفاده از رابطهٔ (٤) محاسبه شده‌است [14]. دبی خروجی از سیلاب‌دشت همگرا در واحد طول کانال نیز بااستفاده از رابطهٔ (۵) برآورد شده‌است.

$$R_{Cfp} = \rho g\bar{h}_{Cfp}A_{wCfp} \qquad (٤)$$

$$q_{Cfp} = \frac{Q_{1Cfp} - Q_{2Cfp}}{L} \qquad (۵)$$

در این رابطه‌ها $\bar{h}_{Cfp}$ فاصلهٔ مرکز سطح تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا تا سطح آزاد آب و A_{wCfp} مساحت تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت همگرا بر صفحهٔ عمود بر جهت جریان (صفحهٔ yz) است.

نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نیز با انتخاب حجم کنترل در سیلاب‌دشت واگرا محاسبه شده‌است (شکل (۱۰) را نگاه کنید).



شکل ۱۰ حجم کنترل بین دو مقطع اندازه‌گیری متوالی در سیلاب‌دشت واگرا

باا ستفاده از معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا، می‌توان نوشت:

$$F_{p1Dfp} - F_{p2Dfp} + W_{Dfp}S_0 - \sum LSF_{iDfp} + R_{Dfp}$$
$$-ASF_{vDfp} = \rho\beta_{2Dfp}U_{2Dfp}Q_{2Dfp}$$
$$-\rho\beta_{1Dfp}U_{1Dfp}Q_{1Dfp} - \rho U_{iDfp}q_{Dfp}L \quad (٦)$$

در رابطهٔ (٦) منظور از زیرنویس Dfp سیلاب‌دشت واگرا اســت. با بازنویســی و مرتب کردن رابطهٔ (٦)، خواهیم داشت:

$$-(F_{p1Dfp} - F_{p2Dfp}) - \rho g\bar{A}_{Dfp}LS_0 + (\overline{SF}_1 + \overline{SF}_2)L$$
$$-R_{Dfp} + (\rho\beta_{2Dfp}U_{2Dfp}Q_{2Dfp} - \rho\beta_{1Dfp}U_{1Dfp}Q_{1Dfp})$$
$$-\rho U_{iDfp}q_{Dfp}L + ASF_{vDfp} = 0 \quad (٧)$$

در رابطهٔ (٧) $\overline{A}_{Dfp}$ متوسط سطح مقطع جریان در حجم کنترل درنظر گرفته‌شده در سیلاب‌دشت واگرا، $\overline{SF}_1$ و $\overline{SF}_2$ به‌ترتیب نیروی برشی وارد بر واحد طول دیواره و کف سیلاب‌دشت واگرا، U_{iDfp} متوسط سرعت جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا، R_{Dfp} نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا، q_{Dfp} دبی عرضی ورودی به سیلاب‌دشت واگرا در واحد طول کانال و ASF_{vDfp} نیروی برشی ظاهری ایجادشده در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است. برای تعیین مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت واگرا از رابطهٔ (٨) و برای محاسبهٔ جریان ورودی به سیلاب‌دشت واگرا در واحد طول کانال نیز از رابطهٔ (٩) استفاده شده‌است.

$$R_{Dfp} = \rho g\bar{h}_{Dfp}A_{wDfp} \quad (٨)$$

$$q_{Dfp} = \frac{Q_{2Dfp} - Q_{1Dfp}}{L} \quad (٩)$$

در این روابط $\bar{h}_{Dfp}$ فاصلهٔ مرکز سـطح تصـویر دیوارهٔ سـیلاب‌دشـت واگرا تا سـطح آزاد آب، A_{wDfp} سطح مقطع تـصویر دیوارهٔ سیلاب‌د شت واگرا برروی صـــفحهٔ عمود بر جـهت جریان و Q_{1Dfp} و Q_{2Dfp} نیز به‌ترتیب دبی جریان ورودی به و خروجی از حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا هستند.

نیروی برشـی ظاهری در فصـل مشـترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا به‌همراه سـایر جملات معادلات اندازه حرکت (معادلات ۳ و ۷) برای کانال مرکب با زوایای اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه محاسبه و در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده‌است.

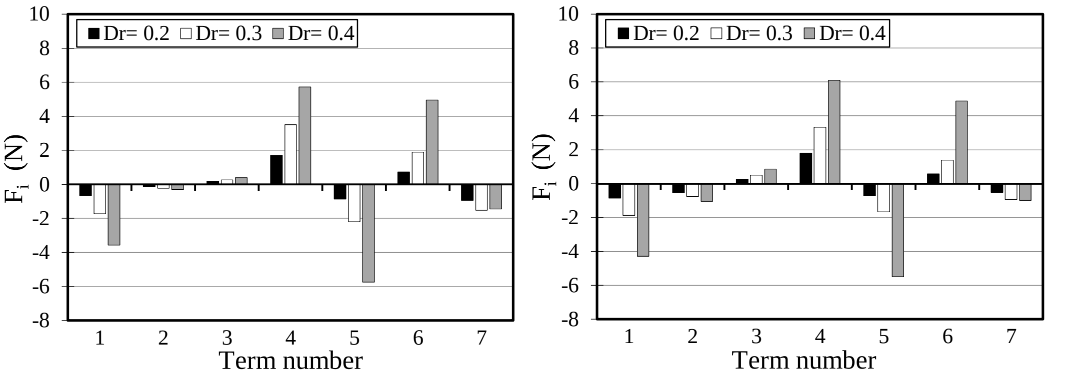
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمودار میله‌ای تغییرات جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت به‌ترتیب برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا و سیلاب‌دشت واگرا نشان داده شده‌است. در این جدول‌ها و شکل‌ها، منظور از جملهٔ اول برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر حجم کنترل، جملهٔ دوم مؤلفهٔ نیروی وزن در راستای جریان، جملهٔ سوم نیروی برشی مرزها، جملهٔ چهارم مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت‌ها درراستای جریان، جملهٔ پنجم تغییرات اندازه حرکت در حجم کنترل، جملهٔ ششم اندازه حرکت ناشی از جریان عرضی منتقل‌شده از سیلاب‌دشت همگرا به کانال اصلی و بالعکس از کانال اصلی به سیلاب‌دشت واگرا و جملهٔ هفتم نیروی برشی ظاهری به‌وجودآمده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها است. باتوجه به کاهش سطح مقطع جریان در طول حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا، برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر حجم کنترل (جملهٔ اول معادلهٔ اندازه حرکت) با درنظر گرفتن علامت، منفی است. لیکن در سیلاب‌دشت واگرا به‌دلیل افزایش سطح مقطع جریان در طول حجم کنترل، برآیند نیروی فشار هیدرواستاتیک با لحاظ کردن علامت، دارای مقداری مثبت است (شکل ۱۲). هم‌چنین قدر مطلق مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیواره درراستای جریان (جملهٔ چهارم معادلهٔ اندازه حرکت) در هر دو سیلاب‌دشت همگرا و واگرا برای هر عمق نسبی تقریبا برابر است (حداکثر اختلاف ۷ درصد).

جدول ۲ جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا و برای آزمایش‌های سری SCIF-2 (۱۱/۳۱□) و SCIF-6 (□۳/۸۱)

Term No:		1	2	3	4	5	6	7
Exp.	D_r	$-(F_{p1Cfp}-F_{p2Cfp})$ (N)	$-\rho g\bar{A}_{Cfp}LS_0$ (N)	$(\overline{SF}_6+\overline{SF}_7)L$ (N)	R_{Cfp} (N)	$\rho\beta_{2Cfp}U_{2Cfp}Q_{2Cfp} - \rho\beta_{1Cfp}U_{1Cfp}Q_{1Cfp}$ (N)	$\rho U_{iCfp}q_{Cfp}L$ (N)	ASF_{vCfp} (N)
SCIF-2	۰/۲	−۰/٦٥٦	−۰/۱۳۹	۰/۱۷۹	۱/٦۹۸	−۰/۸٦۹	۰/۷۲۹	−۰/۹٤۱
	۰/۳	−۱/۷۲٤	−۰/۲۲٥	۰/۲٥٦	۳/٥۱٥	−۲/۱۹۳	۱/۸۹٤	−۱/٥۲۳
	۰/٤	−۳/٥٦۰	−۰/۳۱۱	۰/۳۸۷	٥/۷۲٥	−٥/۷٤٦	٤/۹٤۹	−۱/٤٤٤
SCIF-6	۰/۲	−۰/۸٦۳	−۰/٥٤۱	۰/۲٥۳	۱/۸۰۳	−۰/۷۲۲	۰/٥۷۸	−۰/٥۰۹
	۰/۳	−۱/۸۷۹	−۰/۷٦٦	۰/٥۱۰	۳/۳۲۹	−۱/٦٦۷	۱/۳۹٦	−۰/۹۲۳
	۰/٤	−٤/۲۸۸	−۱/۰٤۷	۰/۸٥٥	٦/۰۹۲	−٥/٤۸٤	٤/۸٦٦	−۰/۹۹٤

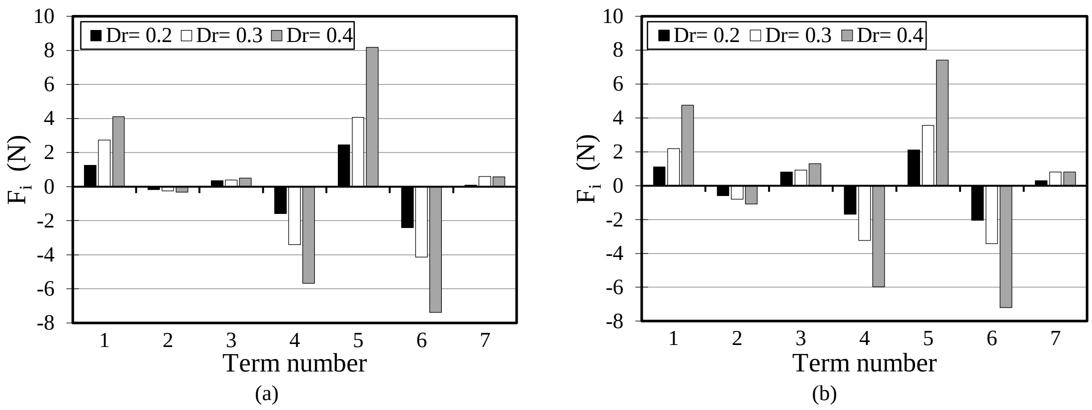
جدول ۳ جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا و برای آزمایش‌های سری SCIF-2 (۱۱/۳۱□) و SCIF-6 (□۳/۸۱)

Term No:		1	2	3	4	5	6	7
Exp.	D_r	$-(F_{p1Dfp}-F_{p2Dfp})$ (N)	$-\rho g\bar{A}_{Dfp}LS_0$ (N)	$(\overline{SF}_1+\overline{SF}_2)L$ (N)	$-R_{Dfp}$ (N)	$\rho\beta_{2Dfp}U_{2Dfp}Q_{2Dfp} - \rho\beta_{1Dfp}U_{1Dfp}Q_{1Dfp}$ (N)	$-\rho U_{iDfp}q_{Dfp}L$ (N)	$ASF_{\nu Dfp}$ (N)
SCIF-2	۰/۲	۱/۲٦۳	−۰/۱٦٤	۰/۳٤٤	−۱/٥۸٥	۲/٤٥٥	−۲/٤۰۷	۰/۰۹٤
	۰/۳	۲/۷۳۸	−۰/۲٥۱	۰/۳۸۷	−۳/۳۹۸	٤/۰۷۳	−٤/۱٤۲	۰/٥۹۲
	۰/٤	٤/۱۱۲	−۰/۳۲۱	۰/٤۹۹	−٥/٦۷۷	۸/۱۷۷	−۷/۳۷٥	۰/٥۸٤
SCIF-6	۰/۲	۱/۱۰٥	−۰/٥۸٥	۰/۸۰۱	−۱/٦۸۰	۲/۱۱۱	−۲/۰٥۲	۰/۳۰۱
	۰/۳	۲/۱۸۲	−۰/۷۹۹	۰/۹۱۱	−۳/۲۳٥	۳/٥٦۲	−۳/٤۳۱	۰/۸۱۰
	۰/٤	٤/۷٥۱	−۱/۰۸۷	۱/۲۹۷	−٥/۹۷۹	۷/٤۱۷	−۷/۱۹۹	۰/۸۰۱



(b) (a)

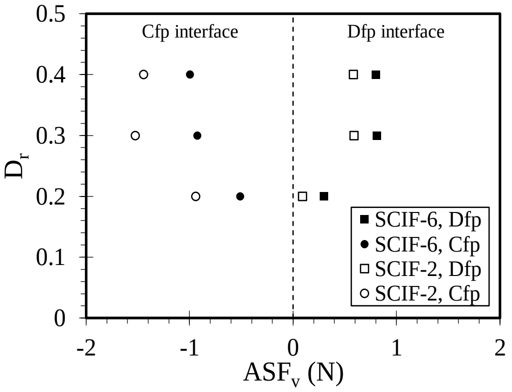
شکل ۱۱ نمودار میله‌ای جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت همگرا در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱□ (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱□ (SCIF-6)



شکل ۱۲ نمودار میله‌ای جملات مختلف معادلهٔ اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا در کانال مرکب با زاویهٔ اریب (a) ۱۱/۳۱° (SCIF-2)، (b) ۳/۸۱° (SCIF-6)

قدر مطلق تغییرات اندازه حرکت (جملهٔ پنجم معادلهٔ اندازه حرکت) در سیلاب‌دشت واگرا برای عمق‌های نسبی مختلف به‌طور متوسط در حدود ۲ برابر مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است که نشان‌دهندهٔ سریع‌تر بودن جریان در سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سیلاب‌دشت همگرا است. هم‌چنین قدر مطلق مقدار تبادل اندازه حرکت انجام‌شده بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا (جملهٔ ششم معادلهٔ اندازه حرکت) برای عمق‌های نسبی مختلف در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه به‌ترتیب نزدیک به ۲/۳ و ۲/۵ برابر قدرمطلق تبادل اندازه حرکت صورت‌گرفته بین سیلاب‌دشت همگرا و کانال اصلی است.

در شکل (۱۳) رابطهٔ میان نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا و عمق نسبی جریان برای کانال مرکب با زوایای اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه نشان داده شده‌است. باتوجه به شکل (۱۳) نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا همواره دارای علامت منفی است. نتیجه‌ای مشابه در مطالعات انجام‌شده برروی کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا توسط رضائی و نایت [14] گزارش شده‌است. این در حالی است که نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا دارای علامت مثبت است. این موضوع بیانگر آن است که در کانال‌های مرکب مورب جریان خروجی از سیلاب‌دشت همگرا باعث سریع‌تر شدن جریان در کانال اصلی شده و جریان ورودی از طرف کانال اصلی به سیلاب‌دشت واگرا سبب افزایش سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا شده‌است. قدر مطلق نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا همواره بزرگ‌تر از مقدار نظیر آن در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا است. این موضوع بیان‌کنندهٔ آن است که اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا نسبت‌به اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا بیشتر است. با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، مقدار نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا برای عمق‌های نسبی مختلف به‌طور متوسط در حدود ۳۹ درصد افزایش یافته‌است. روند مشابه‌ای توسط رضائی و نایت [14] در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا مشاهده شده‌است. این در حالی است که افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها سبب کاهش نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا شده‌است (شکل ۱۳).

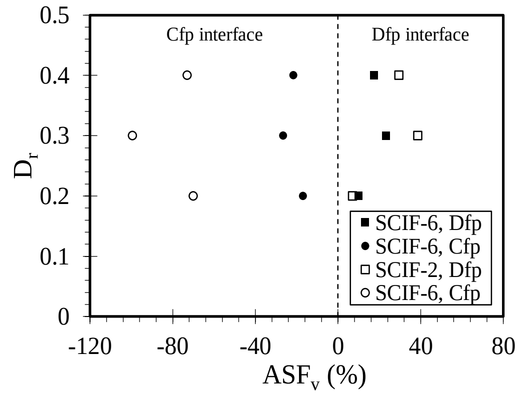


شکل ۱۳ نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای کانال مرکب با زاویه‌های اریب مختلف

بااستفاده از رابطهٔ (۱۰) نیروی برشی ظاهری ایجادشده در فصل مشترک قائم کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به‌صورت درصدی از کل نیروی برشی برای هر دو کانال مرکب مورب (با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه) محاسبه و در شکل (۱۴) نشان داده شده‌است.

$$\%\mathrm{ASF}_v = \frac{\mathrm{ASF}_v}{\sum \overline{\mathrm{SF}}_i} \times 100 \qquad (۱۰)$$

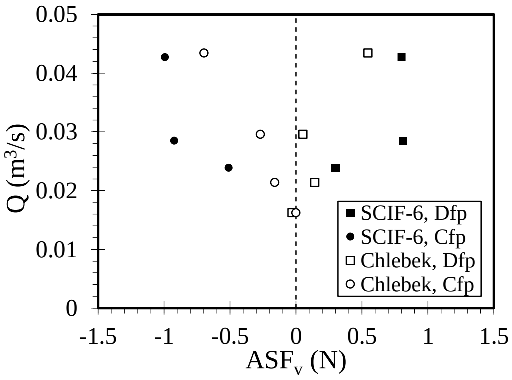
در رابطهٔ (۱۰)، ASF_v نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و $\sum \overline{\mathrm{SF}}_i$ متوسط مجموع نیروی‌های برشی ایجاد شده در کل مرزهای کانال مرکب مورب است.



شکل ۱٤ درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای کانال مرکب با زاویه‌های اریب مختلف

باتوجه به شکل (۱٤) می‌توان دریافت که با افزایش عمق نسبی جریان، قدرمطلق درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به‌ازای عمق نسبی ۰/۳ بیشترین مقدار را دارد و با رسیدن عمق نسبی جریان به ۰/٤ اندکی کاهش می‌یابد. مشابه این پدیده در کانال‌های مرکب منشوری نیز مشاهده شده‌است [15].

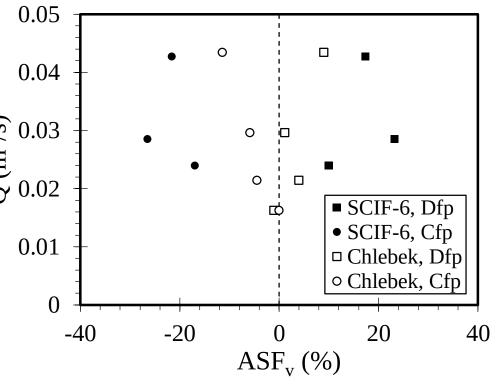
به‌منظور بررسی اثر شیب جانبی سیلاب‌دشت‌ها بر اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال‌های مرکب مورب، مقدار و درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا برای زاویهٔ اریب ۳/۸۱ درجه (پژوهش حاضر) با نتایج مطالعات چلبک [3] مقایسه و در شکل‌های (۱۵) و (۱٦) آورده شده‌است (در این شکل‌ها باتوجه به تفاوت در تعریف عمق نسبی، از مقادیر دبی جریان برای مقایسه استفاده شده‌است).



شکل ۱۵ مقایسهٔ نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب با زاویهٔ اریب □۳/۸۱ (SCIF-6) و نتایج مطالعات چلبک (۲۰۰۹)

شکل‌های (۱۵) و (۱٦) نشان می‌دهند که علامت نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار (پژوهش حاضر) و کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های افقی (مطالعات چلبک [3]) یکسان است. این موضوع بیان‌کنندهٔ رفتار مشابه

جریان در هر دو کانال مرکب مورب می‌باشد. این در حالی است که در کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های شیب‌دار، شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها سبب افزایش مقدار نیروهای برشی ظاهری (اندرکنش) ایجادشده در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها نسبت‌به کانال مرکب مورب با سیلاب‌دشت‌های افقی شده‌است.



شکل ۱٦ مقایسهٔ درصد نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب با زاویهٔ اریب ۳/۸۱° (SCIF-6) و نتایج مطالعات چلبک (۲۰۰۹)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اندرکنش جریان بین زیربخش‌های کانال‌های مرکب مورب، ویژگی‌های مختلف جریان شامل توزیع سرعت و توزیع تنش برشی مرزی در مقاطع مختلف در طول ناحیهٔ اریب کانال اندازه‌گیری شده‌است. سپس بااستفاده از معادلات اندازه حرکت، نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها محاسبه شده‌است. این مطالعات به‌صورت آزمایشگاهی در سه عمق نسبی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ و برروی کانال‌های مرکب مورب با زاویه‌های اریب ۱۱/۳۱و ۳/۸۱ درجه و با سیلاب دشت‌هایی با شیب جانبی برابر ۰/۰۷۵ انجام شده‌است. تعدادی از مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش در ادامه آورده شده‌است:

۱. در کانال‌های مرکب مورب سرعت جریان در مقطع ابتدائی ناحیهٔ اریب کانال همواره بیشترین مقدار را دارد و با حرکت در امتداد ناحیهٔ اریب، سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا کاهش می‌یابد لیکن سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین با افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۳/۸۱ به ۱۱/۳۱ درجه، سرعت جریان در کل مقطع عرضی کانال به‌ویژه برروی سیلاب‌دشت واگرا افزایش یافته‌است.

۲. توزیع سرعت جریان در امتداد ناحیهٔ اریب کانال در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا روندی کاهشی دارد و همواره سرعت متوسط جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از مقدار نظیر آن در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا است.

۳. توزیع عرضی تنش برشی مرزی در اطراف پیرامون مرطوب کانال‌های مرکب مورب به‌صورت نامتقارن است و همواره مقدار تنش برشی مرزی در سیلاب‌دشت واگرا بیشتر از مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است.

٤. در کانال‌های مرکب مورب، افزایش عمق نسبی جریان و یا افزایش زاویهٔ اریب سیلاب‌دشت‌ها باعث افزایش مقدار تنش برشی مرزی در کل مقطع کانال به‌ویژه برروی سیلاب‌دشت همگرا می‌شود.

۵. قدر مطلق تغییرات اندازه حرکت در حجم کنترل انتخابی در سیلاب‌دشت واگرا نزدیک به دو برابر مقدار نظیر آن در سیلاب‌دشت همگرا است که نشان‌دهندهٔ بیشتر بودن سرعت جریان در سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سرعت جریان در سیلاب‌دشت همگرا است.

٦. قدر مطلق تبادل اندازه حرکت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به سیلاب‌دشت همگرا بیش از دو برابر است. این موضوع بیانگر آن است که در کانال‌های مرکب مورب، میزان تبادل جرم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا نسبت‌به جرم مبادله‌شده بین سیلاب‌دشت همگرا و کانال اصلی بیشتر است.

۷. نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا دارای علامت منفی و در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا دارای مقداری مثبت است. باتوجه به این موضوع جریان عرضی خروجی از سیلاب‌دشت همگرا سبب افزایش سرعت جریان در کانال اصلی شده و جریان ورودی از کانال اصلی به سیلاب‌دشت واگرا نیز باعث سرعت گرفتن جریان در سیلاب‌دشت واگرا شده‌است.

۸. مقایسهٔ نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات چلبک [3] نشان می‌دهد که شیب عرضی سیلاب‌دشت‌ها در کانال‌های مرکب مورب باعث افزایش میزان نیروهای برشی ظاهری (اندرکنش) در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها شده‌است.

فهرست علائم

A	سطح مقطع جریان، m^2
$\bar{A}$	متوسط سطح مقطع جریان، m^2
A_w	سطح مقطع تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت، m^2
ASF_v	نیروی برشی ظاهری، N
B_{fp}	عرض سیلاب‌دشت، m
Cfp	سیلاب‌دشت همگرا
D	عمق هیدرولیکی، m
D_r	عمق نسبی جریان
Dfp	سیلاب‌دشت واگرا
F_r	عدد فرود جریان
F_p	نیروی فشار هیدرواستاتیک، N
g	شتاب گرانش زمین، m/s^2
H	عمق جریان، m
$\overline{H_{fp}}$	میانگین عمق جریان در سیلاب‌دشت‌ها، m
$\bar{h}$	فاصلهٔ مرکز سطح تصویر دیوارهٔ سیلاب‌دشت تا سطح آزاد آب، m
L	طول حجم کنترل، m
Q	دبی جریان، m^3/s
q	دبی جریان عرضی در واحد طول، m^2/s
R	مؤلفهٔ نیروی عکس‌العمل دیوارهٔ سیلاب‌دشت در راستای جریان، N
S_0	شیب کف کانال
SF	نیروی برشی در واحد طول، N/m
U	سرعت جریان، m/s
U_i	سرعت جریان در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، m/s
U_d	سرعت متوسط در عمق، m/s
U_m	سرعت متوسط جریان، m/s
u	مؤلفهٔ طولی سرعت جریان، m/s
W	نیروی وزن، N
x	محور جهت جریان
y	محور عرضی عمود بر جهت جریان
z	محور ارتفاعی عمود بر جهت جریان
β	ضریب اصلاح اندازه حرکت
θ	زاویهٔ اریب کانال
τ_b	تنش برشی مرزی، N/m^2
ρ	جرم مخصوص آب، kg/m^3

مراجع

1. Sellin, R. H. J., "A Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and that Over its Flood Plain", *La Houille Blanche*, Vol. 7, pp. 793-802, (1964).
2. Tominaga, A., and Nezu, I., "Turbulent Structure in Compound Open-channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 21-41, (1991).
3. Chlebek, J., "Modelling of Simple Prismatic Channels with Varying Roughness Using the SKM and a

Study of Flows in Smooth Non-Prismatic Channels with Skewed Floodplains", Birmingham University, (2009).

4. James, M., and Brown, B. J., "Geometric Parameters that Influence Floodplain Flow, Waterways Experiment Section", Hydraulics Laboratory, Department of Defense, US Army Corps of Engineering, Report H-77-1, Vicksburg, Mississippi, (1977).
5. Jasem, H. K., "Flow in Two-Stage Channels with the Main Channel Skewed to the Flood Plain Direction", University of Glasgow, (1990).
6. Ervine, D. A., and Jasem, H. R., "Observation on Flows in Skewed Compound Channels", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, Maritime and Energy*, ICE, Vol. 112, No. 3, pp. 249-259, (1995).
7. Dolati Mahtaj, M., "Experimental Study of Flow in Skewed Compound Channel with Inclined Floodplains", Bu-Ali Sina University, (2021). (In Persian)
8. Elliott, S. C. A., and Sellin, R. H. J., "SERC Flood Channel Facility: Skewed Flow Experiments", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 2, pp. 197-214, (1990).
9. Sellin, R. H. J., "Hydraulic Performance of a Skewed Two-Stage Flood Channel", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 33, No. 1, pp. 43-64, (1995).
10. Seif, M. M., and Rezaei, B., "Numerical Study on the Effects of the Floodplains Angles on Interaction between the Main Channel and Floodplains in Skewed Compound Channels", *journal of Ferdowsi Civil Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 151-164, (2019). (In Persian)
11. Elliott, S. C. A., "An Investigation into Skew Channel Flow", University of Bristol, (1990).
12. Chlebek, J., Bousmar, D., Knight, D. W., and Sterling, M., "A Comparison of Overbank Flow Conditions in Skewed and Converging/ Diverging Channels", *Proceedings of the River Flow 2010*, Braunschweig, Germany, Vol. 1, pp. 503-511, (2010).
13. Bousmar, D., Jacqmin, T., Wyseur, S., and Van Emelen, S., "Flow in Skewed Compound Channels with Rough Floodplains", Proceedings of the River Flow 2012, San Jose, Costa Rica, Vol. 1, pp. 217-224, (2012).
14. Rezaei, B., and Knight, D. W., "Overbank Flow in Compound Channels with Non-Prismatic Floodplains", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 8, pp. 815-824, (2011).
15. Rezaei, B., "Overbank Flow in Compound Channels with Prismatic and Non-Prismatic Floodplains", Birmingham University, (2006).